

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И ЗАРЯДОВЫЙ СОСТАВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ИЗМЕРЕННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТИК-2

© 2004 г. В. И. Зацепин<sup>1</sup>, Дж. Х. Адамс мл.<sup>2</sup>, Х. С. Ан<sup>3</sup>, К. Е. Батьков<sup>1</sup>, Г. Л. Башинджагян<sup>1</sup>, Дж. З. Ванг<sup>3</sup>, Дж. П. Вефель<sup>4</sup>, Дж. Ву<sup>3</sup>, О. Ганел<sup>3</sup>, Р. Гунасингха<sup>5</sup>, Т. Г. Гузик<sup>4</sup>, Дж. Изберт<sup>4</sup>, К. Ц. Ким<sup>3</sup>, М. Кристл<sup>2</sup>, Е. Н. Кузнецов<sup>1</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, А. Д. Панов<sup>1</sup>, Н. В. Сокольская<sup>1</sup>, Э. С. Сно<sup>3</sup>, А. Фазели<sup>5</sup>, Дж. Чанг<sup>6</sup>, В. К. Х. Шмидт<sup>6</sup>

Баллонный эксперимент АТИК (АТИС – Advanced Thin Ionization Calorimeter) предназначен для измерения энергетических спектров галактических космических лучей с индивидуальным разрешением по заряду от протонов до железа в энергетическом интервале от 50 ГэВ до 100 ТэВ. Спектрометр АТИК состоит из полностью активного ВГО-калориметра, углеродной мишени, сцинтилляционных годоскопов и кремниевой матрицы. Впервые в космических лучах высокой энергии для измерения заряда была использована матрица кремниевых детекторов, позволившая решить проблему обратного тока путем высокой сегментации детектора заряда. АТИК совершил два успешных баллонных полета в Антарктиде: с 28.12.2000 по 13.01.2001 (тестовый полет АТИК-1) и с 29.12.2002 по 18.1.2003 (научный полет АТИК-2). В этой работе мы представляем текущее состояние анализа спектров, измеренных в научном полете АТИК-2, и сравниваем результаты с модельными предсказаниями.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ АТИК

Описание спектрометра АТИК и метод калибровки калориметра можно найти в [1]. Реконструкция событий, калибровка детекторов кремниевой матрицы, метод определения заряда первичной частицы и достигнутое разрешение детектора заряда подробно описаны в [2, 3]. АТИК совершил два полета в Антарктиде: тестовый полет АТИК-1 и научный полет АТИК-2. Предварительные результаты о спектрах протонов и гелия из тестового полета были опубликованы в [4, 5]. В этой статье будет приведено текущее состояние анализа данных АТИК-2, в котором все системы спектрометра работали более надежно. В частности, калориметрические каналы в АТИК-2 дали лучшую согласованность между различными диапазонами усиления и были лучше откалиброваны.

### 2. ПЕРЕХОД К ПЕРВИЧНЫМ СПЕКТРАМ

В каждом реконструированном событии энерговыделение  $E_d$  определяется суммированием энерговыделений во всех кристаллах германата висмута

(ВГО). Переход от спектра по  $E_d$  к спектру по первичной энергии  $E$ , принимая приближение, используемое для эмульсионных калориметров [6], осуществляется сдвигом по шкале энергии в  $k_s^{-1}$  раз, где

$$k_s = \frac{\int_0^1 k^{\gamma+1} f(k) dk}{\int_0^1 k^{\gamma} f(k) dk},$$

где  $f(k)$  – распределение величины  $k = E_d/E$  при фиксированном  $E$ , а  $\gamma$  – показатель интегрального спектра. Значения  $k_s$  были получены моделированием прохождения частиц через АТИК по программе FLUKA [7] для различных ядер и интегрального степенного спектра с показателем  $\gamma = 1.6$ . Результаты расчета  $k_s$  не сильно зависят от выбора  $\gamma = 1.6$ . Для постоянной величины  $k_s$  спектральные индексы спектров по  $E_d$  и по  $E$  не различаются. Вообще говоря, величины  $k_s$  зависят от  $E$  из-за утечки через дно и бока калориметра. Наша предварительная оценка показывает, что эта зависимость слабая и приводит к укрупнению спектра по  $E_d$  примерно на  $\Delta\gamma = 0.04$ . В настоящей работе будут приведены спектральные индексы спектров по  $E_d$  без введения этой поправки, которая будет уточняться. Потоки определены по формуле

$$I = (dN/dE)/(S\Omega T\epsilon\eta W_{ef}),$$

где  $S\Omega$  – геометрический фактор прибора,  $T$  – живое время экспозиции,  $\epsilon$  – эффективность алгоритма реконструкции события,  $\eta$  – поправка на

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

<sup>2</sup> Центр космических исследований Маршалла, НАСА, США.

<sup>3</sup> Университет штата Мериленд, США.

<sup>4</sup> Университет штата Луизиана, США.

<sup>5</sup> Южный Университет, США.

<sup>6</sup> Институт Макса Планка, Линдау, Германия.

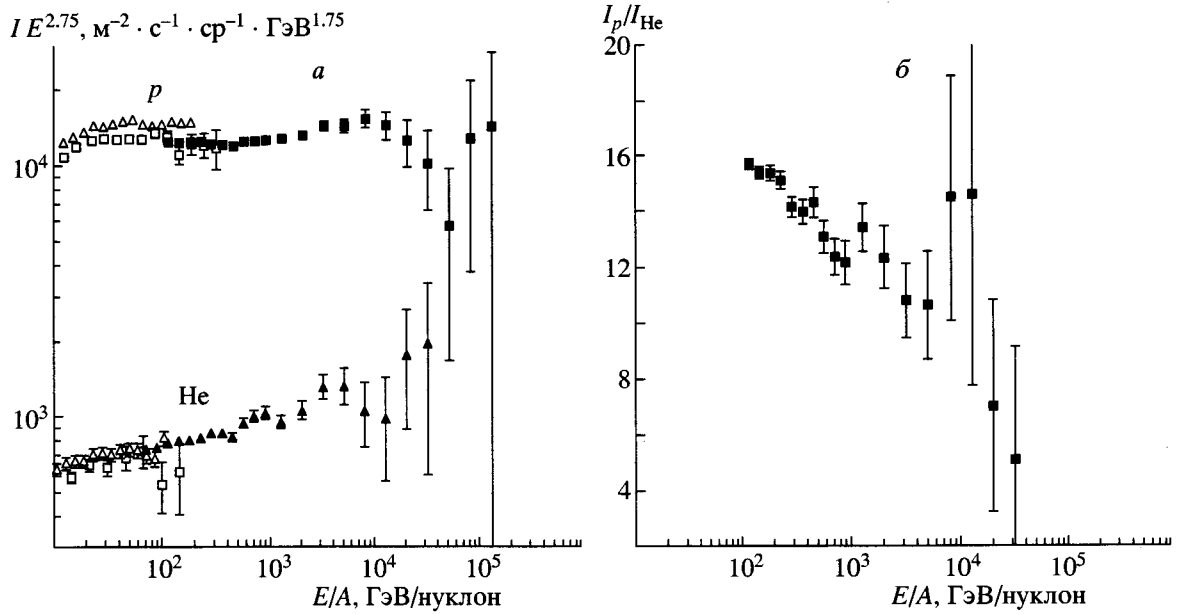


Рис. 1. Спектры протонов и гелия (а) и их отношение (б). Черные квадраты – АТИК, светлые треугольники – [8], светлые квадраты – [9].

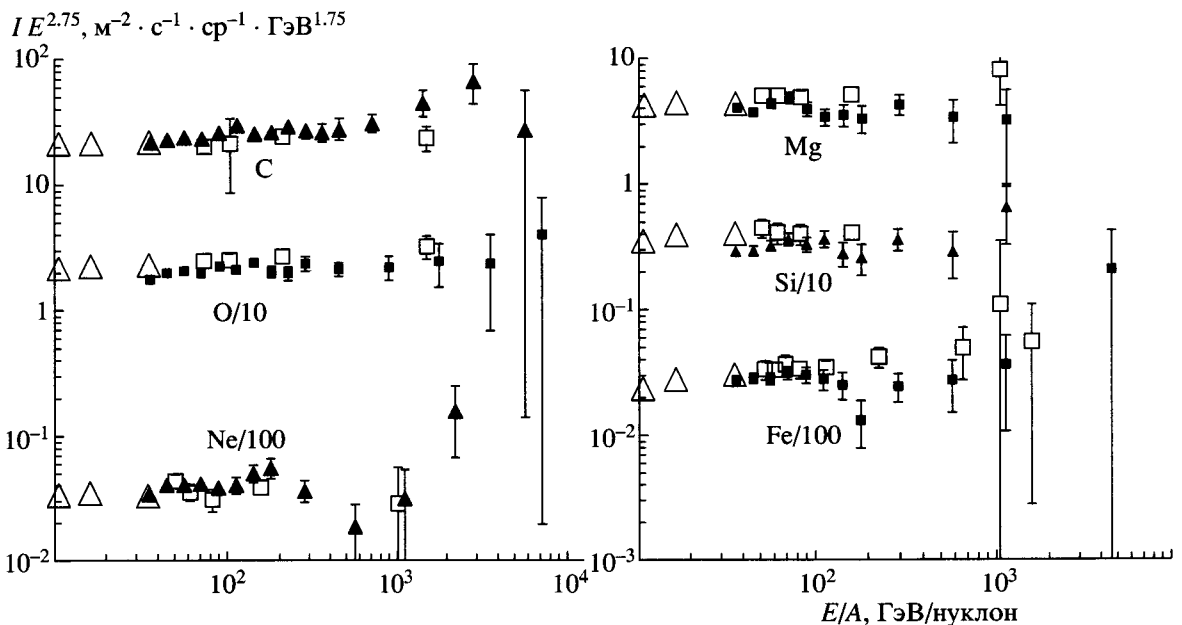


Рис. 2. Спектры ядер. Черные треугольники и квадраты – АТИК, светлые треугольники – [10], светлые квадраты – [11].

поглощение в остаточной атмосфере, а  $W_{ef} = \int_0^1 k^\gamma f(k) dk / k_s^\gamma$  дает нормировочный коэффициент по абсолютной интенсивности между энергетическим спектром и спектром энерговыделений. Значения этих величин будут приведены в более подробной публикации.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Все данные были получены для событий, траектории которых проходили через центральную

область кремниевой матрицы размером  $80 \times 80 \text{ см}^2$ , при полном размере матрицы  $100 \times 100 \text{ см}^2$ . Данные АТИК-2 в области  $<30 \text{ ГэВ/нуклон}$  для ядер тяжелее гелия, в области  $<50 \text{ ГэВ/нуклон}$  для гелия и  $<100 \text{ ГэВ}$  для протонов здесь не приводятся из-за неэффективности триггера. На рис. 1а приведены дифференциальные спектры протонов и гелия вместе с данными AMS [8] и CAPRICE-98 [9], а на рис. 1б – отношение потоков протонов и гелия в АТИК в зависимости от энергии на нуклон.

Зарядовый состав при энергии на частицу  $E > E_{th}$ , ТэВ

$E_{th}$	$p$	He	CNO	Ne-S	$Z > 17$
0.1	46.4±0.1	28.4±0.1	10.9±0.1	6.9±0.2	4.0±0.1
0.3	38.0±0.2	27.7±0.1	13.5±0.1	10.2±0.1	7.0±0.1
0.5	35.0±0.3	26.6±0.2	14.1±0.2	11.5±0.1	9.3±0.1
1	33.3±0.5	26.4±0.4	14.0±0.3	12.0±0.3	10.9±0.31
2.5	33±1 (39±3)	28±1 (27±2)	13±1 (13±1)	11±1 (10±1)	11±1 (11±1)
5	32±2 (37±3)	29±2 (28±2)	13±1 (14±2)	11±1 (9±1)	11±1 (12±2)
10	28±3 (31±5)	32±3 (30±4)	14±2 (14±3)	12±2 (13±3)	11±2 (12±3)
25	21±6	33±8	19±6	13±4	11±4

Примечание. В скобках приведены результаты СОКОЛ [12].

Если эти спектры фитировать простым степенным законом, то  $\gamma_p = 2.745 \pm 0.003$  для  $E > 100$  ГэВ/нуклон,  $\gamma_{He} = 2.641 \pm 0.008$  для  $E > 75$  ГэВ/нуклон. Приведенные ошибки – статистические. Заметим, что эти фиты определяются областью низких энергий, содержащей основную часть событий. В области высоких энергий виден значительный разброс из-за низкой статистики и эффекта разбиения на интервалы. Детальное методическое исследование тэв-ной области энергий продолжается.

На рис. 2 показаны спектры четных ядер вместе с данными НЕАО-3 [10] и CRN [11]. В степенном приближении спектральные индексы равны  $2.61 \pm 0.02$ ,  $2.66 \pm 0.02$ ,  $2.65 \pm 0.06$ ,  $2.80 \pm 0.06$ ,  $2.68 \pm 0.07$ ,  $2.71 \pm 0.07$ , соответственно для C, O, Ne, Mg, Si и Fe.

Полученные данные позволяют также рассчитать зарядовый состав ГКЛ в области энергии больше 100 ГэВ на частицу. Эти данные приведены в таблице. Не приведены данные для области зарядов от 3 до 5, так как эта область зарядов может быть сильно искажена фрагментацией более тяжелых ядер в остаточной атмосфере, а соответствующая поправка еще не введена. Там же для области  $>2.5$  ТэВ приведены данные эксперимента СОКОЛ [12].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что интенсивности всех элементов находятся в разумном согласии с данными AMS [8], CAPRICE [9], НЕАО-3 [10] и CRN [11]. Высокая статистическая точность данных позволила обнаружить различие спектральных индексов протонов и гелия, которое составляет  $\gamma_p - \gamma_{He} = 0.104 \pm 0.0085$ . Различие спектров видно также из рис. 1б, где представлено отношение протонов к гелию в зависимости от энергии на нуклон.

Хотя приведенные результаты, полученные в полете АТИК-2, предварительные, а приведенные ошибки в значениях спектральных индексов –

только статистические, уже сейчас можно обсудить, что могли бы значить для теории такие результаты, если они будут подтверждены в дальнейшем. Модель Бирмана [13] предсказывает, что полный поток космических лучей в области до “колена” является смесью двух потоков от различных источников: взрывов сверхновых в межзвездную среду (ISM-SN) и взрывов массивных сверхновых в звездный ветер звезды-предшественницы (wind-SN). Предсказывается, что после учета утечки из галактики спектральные индексы для ISM-SN и wind-SN должны быть 2.74 и 2.67 соответственно. Спектры, измеренные в АТИК-2, замечательно согласуются с этой моделью, если протоны считать доминирующими для ISM-SN, а гелий доминирует в wind-SN.

С российской стороны работа имеет поддержку РФФИ, грант № 02-02-16545. В США работа поддержана грантами НАСА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guzik T.G. et al.* // Adv. Space. Res. 2004. V. 33. P. 1763.
2. *Adams J.H., Башинджагян Г.Л., Зацепин В.И. и др.* // ПТЭ. 2001. Т. 4 С. 38.
3. *Zatsepin V.I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2004. V. 524. P. 195.
4. *Zatsepin V.I. et al.* // Proc. 28 ICRC. Tsukuba. 2003. V. 4. P. 1829.
5. *Ahn H.S. et al.* // Ibid. P. 1833.
6. *Barnett T.H. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 1986. V. 251. P. 583.
7. *Fasso' A. et al.* // Proc. Monte Carlo 2000. Conf., Lisbon, 2000.
8. *Alcarac J. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 490. P. 27.
9. *Boezio M. et al.* // Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 583.
10. *Engelman J. et al.* // Astron. Astrophys. 1990. V. 233. P. 96.
11. *Muller D. et al.* // Astrrophys. J. 1991. V. 374. P. 356.
12. *Ivanenko I.P. et al.* // Proc. 23 ICRC. Calgary. 1993. V. 2. P. 17.
13. *Biermann P.L. et al.* // e-print astro-ph/0302201. 2003.